بررسی رفتار خمشی تیر مسلح طرهٔ ساخته‌شده با بتن الیافی توانمند HPFRCC و چیدمان متفاوت خاموت‌گذاری★

«یادداشت پژوهشی»

علیرضا تقی‌خانی[1]　　محمدکاظم شربتدار[2]

چکیده *این مقاله به بررسی آزمایشگاهی رفتار شش تیر بتن مسلح طره‌ای ساخته‌شده با بتن HPFRCC با دو نوع درصد الیاف و دو نوع خاموت‌گذاری (فشرده و غیرفشرده) در ناحیهٔ ویژه تحت بارگذاری استاتیکی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که حضور الیاف به‌خصوص در نمونه‌ها با خاموت غیرفشرده باعث افزایش جذب انرژی و تأخیر در ایجاد گسیختگی در نمونه‌های با بتن HPFRCC نسبت‌به بتن معمولی می‌شود و شکل‌پذیری تیرهای HPFRCC نسبت‌به تیر مرجع ۲ تا ۲/۳۳ برابر و باربری آن بین ۲ تا ۱۷/۵ درصد در نمونه‌های مختلف افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی تیر طره، الیاف، خاموت‌گذاری، شکل‌پذیری، کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC).

Flexural Behavior Investigation of HPFRCC Cantilever RC Beam with Different Stirrup Configuration

A. Taghikhani　　M. K. Sharbatdar

Abstract *Experimental investigation of six RC cantilever beam made with High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC) with two different fiber percentage and two different stirrup configuration (compact and non-compact) under monotonic loading is conducted in this paper. The results showed that the fiber role was more effective in specimens reinforced without compacted stirrups and energy absorption increasing, the rupture creation delay, and crack width and distribution decreasing have been observed. The ductility and load capacity of the HPFRCC specimens were 200 to 233 and 2 to 17.5% more than those of the Reference beams.*

Key Words Cantilever beam; Fiber; Stirrups; Ductility; High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites; HPFRCC.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱/۱٤ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/٦/۲٤ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد سازه، دانشگاه سمنان.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

Email: msharbatdar@semnan.ac.ir

مقدمه

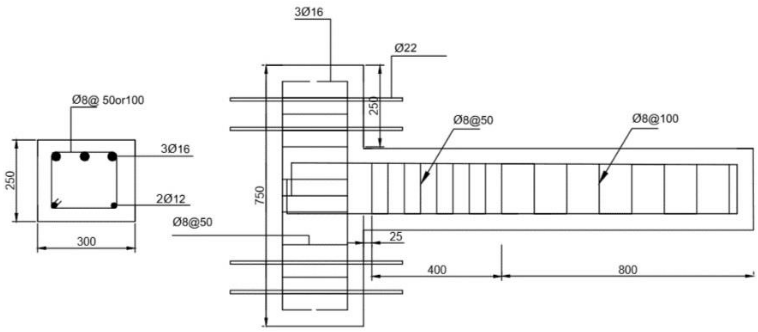
کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی (FRCC) در سال‌های اخیر شاهد پیشرفت‌های چشم‌گیر و زیادی بوده‌اند. عمدهٔ این پیشرفت‌ها به‌سبب توسعهٔ هرچه بیشتر ملات، گونه‌های مختلف الیاف، اندرکنش ملات فرایند تولید کامپوزیت و بهبود مستمر میزان هزینه‌های اجرایی می‌باشد. علاوه‌بر آن می‌توان به مواردی مانند معرفی نسل جدید مواد افزودنی فوق‌روان‌کننده‌ها، کاربرد ریزپرکننده‌ها مثل دودهٔ سیلیسی و خاکستر بادی و فهم بهتر از چگونگی تأثیر آنها بر تخلخل، مقاومت و دوام ملات اشاره نمود. این موارد همگی باعث پیشرفت‌های اساسی در ساخت و مدل‌سازی رفتار این کامپوزیت‌ها شده‌اند. استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) به‌جای مصالح متداول از مدت‌ها پیش مدنظر پژوهشگران قرار گرفته و مطالعات بسیاری را به خود اختصاص داده‌است. این مصالح علاوه‌بر افزایش ظرفیت سازه‌ها دربرابر زلزله به تأمین پایداری بیشتر سازه‌ها دربرابر عوامل مضر محیطی نیز کمک می‌کنند [۱]. هم‌چنین استفاده از بتن‌های با مصالح شکل‌پذیر باعث افزایش مقاومت برشی، افزایش شکل‌پذیری سازه، اتلاف انرژی و رفتار آسیب مدار اعضای سازه‌ای تحت اثر بارهای رفت و برگشتی و کاهش یا حذف آرماتورهای برشی در نواحی بحرانی سازه در برش می‌باشد [2]. در مخلوط‌هایی که با الیاف اصلاح می‌شوند، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، انعطاف‌پذیری و کنترل ترک بهبود می‌یابد [3]. در دههٔ ۱۹۶۰، رامولدی و همکاران بررسی تأثیر الیاف فولادی بر کاهش شکنندگی بتن را در دستور کار قرار دادند [4,5]. گسترش دانش درخصوص چگونگی تأثیر الیاف بر ملات، منجر به تدوین توصیه‌هایی درمورد طراحی سازه‌ای توسط مؤسسهٔ RILEM گردید [6, 7]. در اوایل دههٔ ۱۹۸۰، تولید یک مصالح بتن الیافی با رفتار کششی شکل‌پذیر مورد توجه قرار گرفت که شروع آن توسط اوستون و همکاران در سال ۱۹۷۱ بود [8]. در سال ۱۹۸۹ کرنچل و اسانگ کاربرد مناسب الیاف به‌هم پیوسته به شکل‌پذیری کششی ۱۰۰ برابر نسبت‌به بتن معمولی دست یافتند [9]. در سال ۱۹۹۹ کورباچ وجسی و در سال ۲۰۰۳ نیز نامان ورینهارت و همکاران نوع جدیدی از بتن الیافی با الیاف به‌هم پیوسته را تحت عنوان بتن مسلح بافته‌شده (TRC) ارائه نمودند [10, 11]. وسعت ناحیهٔ سخت‌شدگی کرنش در مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف، کمتر از فولاد می‌باشد و از این جهت مکانیزم سخت‌شدگی کرنش در این مصالح به‌صورت مجازی تشکیل می‌شود [۱۲]. مصالح CARDIFRC که در دانشگاه کاردیف ولز توسعه یافته‌است، یکی از انواع مختلف HPFRCCهاست که توسط فرهت، نیکلایدیس، کانلوپلوس و کاریهالو در سال ۲۰۰۶ ابداع گردید و مقاومت فشاری تا ۲۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۲۷ مگاپاسکال مشاهده شد[13]. ریچارد و چیرزی و هابل و گائوورا با ترکیب دو مفهوم UHPC و FRC مصالح جدیدی تحت عنوان UHPFRCC ارائه دادند که دارای مقاومت کششی، مقاومت فشاری و کرنش کششی نهایی به‌ترتیب بیش از ۱۰ مگاپاسکال، ۱۵۰ مگاپاسکال و ۰٫۰۰۵ بود [14, 15]. محققان به این نتیجه رسیدند که با جایگزینی مصالح HPFRCC به‌جای بتن معمولی در قاب بتن مسلح به‌شکل کامل یا تنها در چشمهٔ اتصال، ظرفیت باربری و تغییرشکل نهایی این قاب افزایش می‌یابد [۱۶]. هم‌چنین در ادامهٔ مطالعات خود دخصوص مفصل پلاستیک در تیر بتن مسلح دریافتند که بااستفاده از مصالح HPFRCC در تیر، طول مفصل پلاستیک و زاویهٔ مفصل پلاستیک نسبت‌به تیر معمولی افزایش یافته‌است [17]. کاربردهای ویژهٔ کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند شامل عرشهٔ پل‌ها و سازه‌های ویژه مثل سکوهای ساحلی، ایستگاه‌های هوایی، سازه‌های بسیار بلند، اتصالات تیر- ستون، سازه‌های مقاوم دربرابر انفجار، سازه‌های مربوط به بانک‌ها و اعضای سازه‌ای میراگر میان قابی و سازه‌های مهم دیگر می‌باشد [18,

[19]. می‌توان این گفتهٔ پارا مونتسینوس را ذکر نمود که الیاف باعث افزایش تحمل خسارت یک سازه می‌گردند [20]. استفاده از این سیستم برای مقابله با طبقات نرم به‌کار می‌رود و می‌تواند تغییرشکل‌های مورد انتظار را برآورده سازد. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از ستون‌های ساخته‌شده از HPFRCC و قرار دادن آنها در کنار ستون‌های طبقهٔ نرم باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سازه در هنگام زلزله می‌شود [21].

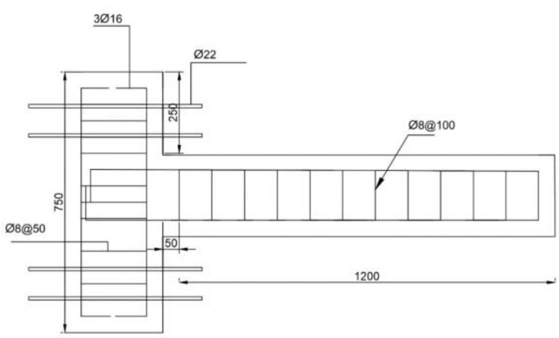
برنامهٔ آزمایشگاهی

جزئیات نمونه‌ها

شش نمونه تیر خمشی طره‌ای با ابعاد مشابه و با دو نوع جزئیات آرماتورگذاری خاموت‌ها ساخته شدند. دو نمونهٔ اول با بتن معمولی و به‌عنوان نمونه‌های مرجع، دو نمونهٔ بعدی با بتن HPFRCC با نیم درصد الیاف و دو نوع خاموت‌گذاری متفاوت و دو نمونهٔ دیگر با HPFRCC و یک درصد الیاف و دو نوع خاموت‌گذاری متفاوت ساخته شدند. در کلیهٔ نمونه‌های تحت آزمایش، عرض مقطع ۲۵۰ و ارتفاع آن ۳۰۰ میلی‌متر بود که با سه آرماتور فوقانی به‌قطر ۱۶ میلی‌متر و دو آرماتور تحتانی به‌قطر ۱۲ میلی‌متر مسلح شد. مقطع ستونک که به‌عنوان تکیه‌گاه گیردار فرض شده‌است به‌عرض ۳۰۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر با شش میلگرد به‌قطر ۱۶ و خاموت به‌قطر ۱۰ به‌فاصلهٔ ۵ سانتی‌متر مسلح شد و ضخامت پوشش آنها نیز حدود ۵۰ میلی‌متر انتخاب گردید. طول تیرها ۱۲۰۰ میلی‌متر و اتصال به‌صورت گیردار بود. ابعاد و جزئیات تیر با خاموت فشرده و بدون خاموت فشرده در شکل (۱) و شکل (۲) نشان داده شده‌است. دو کرنش‌سنج برروی آرماتورهای فوقانی در بر تکیه‌گاه نصب گردیدند. در جدول (۱) نام گذاری و مشخصات نمونه‌ها آمده‌است.



شکل ۱ جزئیات آرماتورگذاری و مقطع نمونه‌های با خاموت‌گذاری فشرده



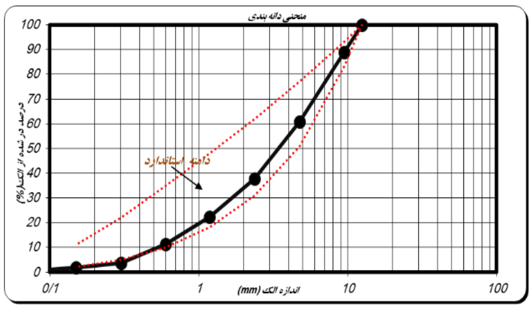
شکل ۲ جزئیات آرماتورگذاری نمونه بدون خاموت فشرده

جدول ۱ نحوهٔ نام‌گذاری نمونه‌ها

شرح نمونه	نام نمونه
نمونهٔ بتن معمولی با خاموت‌گذاری ویژه	RCS
نمونهٔ بتن معمولی بدون خاموت‌گذاری ویژه	RCN
نمونهٔ HPFRCC با خاموت‌گذاری ویژه و نیم درصد الیاف	RHS0.5
نمونهٔ HPFRCC بدون خاموت‌گذاری ویژه و نیم درصد الیاف	RHN0.5
نمونهٔ HPFRCC با خاموت‌گذاری ویژه و یک درصد الیاف	RHS1
نمونهٔ HPFRCC بدون خاموت‌گذاری ویژه و یک درصد الیاف	RHN1

خصوصیات مصالح

شن مورد استفاده در این آزمایش دارای درصد شکستگی معادل ٤٧ درصد است و در محدودهٔ الک ۰/۵ اینچ (۱۲/۵ میلی‌متر) تا الک نمرهٔ ٤ (٤/٧۵ میلی‌متر) قرار دارد. ماسهٔ مورد استفاده در این آزمایش نیز در محدودهٔ زیر الک نمرهٔ ٤ (٤/٧۵ میلی‌متر) قرار دارد. منحنی دانه‌بندی شن و ماسهٔ مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده‌است.



شکل ۳ منحنی دانه بندی سنگدانه‌های مورد استفاده

در این کار آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ II تولید شده توسط کارخانه سیمان شاهرود استفاده شد. الیاف مورد استفاده ماکروسنتتیک (پروپیلن مخصوص تقویت شده) با نام تجاری PPS می باشد. این الیاف همانطور که در شکل ٤ قابل مشاهده است، دارای ابعادی مشابه الیاف فولادی می‌باشند. این الیاف بر خلاف الیاف PP دارای ساختاری رشته‌ای می‌باشند. در جدول (۲) خصوصیات مکانیکی الیاف PPS نشان داده شده‌است.



شکل ٤ الیاف ماکروسنتتیک استفاده‌شده

در هنگام اضافه کردن الیاف به بتن برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از جداشدگی یا پدیدهٔ گلوله شدن و ایجاد یک مخلوط کارا برای ریختن، تراکم و پرداخت بتن باید مدنظر قرار گیرد.

طرح اختلاط بتن معمولی و بتن HPFRCC استفاده‌شده در آزمایش در جدول (۳) ملاحظه می‌شود. لازم به ذکر است که مقاومت ٤۲ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای بتن معمولی برابر ۳۱ مگاپاسکال و برای بتن HPFRCC برابر ۳۰ مگاپاسکال به‌دست آمده‌است.

در این آزمایش از ۳ نوع میلگرد فولادی اصلی استفاده شده‌است که مشخصات قرارگیری و نتایج تست کشش در جدول (٤) نشان داده شده‌است.

جدول ۲ مشخصات الیاف مصرف‌شده

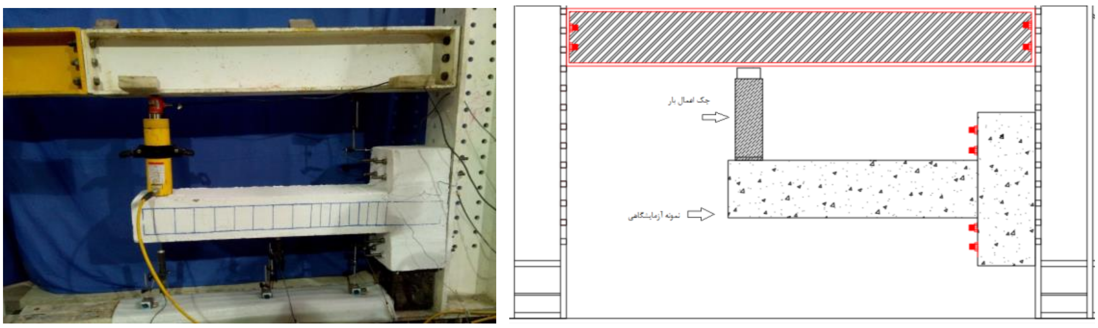
چگالی (kg/dm^3)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	رنگ	قطر (µm)	طول (mm)
۰/۹	۳۵۰۰	۸۰۰	تیره	۱۸	۴۰-۷۰

جدول ۳ طرح اختلاط بتن معمولی و کامپوزیت سیمانی

جمع کل (kg)	الیاف درصد حجمی	فوق‌روان‌کننده (kg)	سیمان (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	آب (kg)	w/c	نوع بتن
۲۳۸۲	–	–	۴۰۰	۸۰۲	۹۸۰	۲۰۰	۰/۵	بتن معمولی
۲۲۹۰	۰/۵	٤	۵۰۰	–	۱۵۵۷	۲۲۵	۰/٤۵	بتن توانمند
۲۲۹٤	۱	٤	۵۰۰	–	۱۵۵۷	۲۲۵	۰/٤۵	بتن توانمند

جدول ٤ مشخصات میلگردهای مصرفی

کرنش جاری‌شدگی	تنش نهایی (MPa)	تنش جاری شدن (MPa)	نمرهٔ میلگرد	توضیحات
۰/۰۰۲۳	٦۷۵/۲	٤۲٦/۳	۱۰	آرماتور برشی عرضی
۰/۰۰۱۹	۵۹۱	٤۲٤	۱۲	آرماتور قطری طولی
۰/۰۰۱۸۵	۵۸۲	۳۹۸	۱٦	آرماتور قطری طولی



شکل ۵ نمای کلی از سیستم چیدمان آزمایش

چیدمان آزمایش

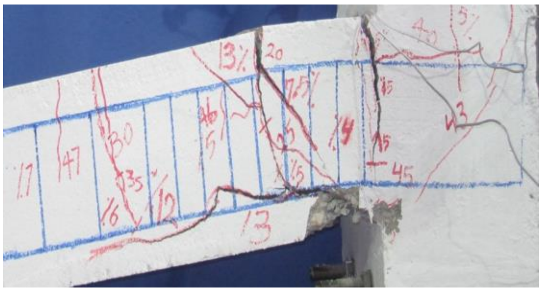
نمای شماتیک و واقعی چیدمان آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده‌است. باتوجه به شابلون کردن سوراخ‌های قاب صلب و کار گذاشتن لوله‌هایی به‌قطر ۱ اینچ در بتن، نمونه با ۸ میلگرد Ø22 دو سر رزوه‌شده برروی قاب صلب قرار می‌گیرد. دو عدد LVDT در بالا و پایین تیر در محل اتصال گیردار قرار داده شده‌است تا جابه‌جایی احتمالی و چرخش اتصال کنترل گردد.

اندازه‌گیری‌ها در حین آزمایش‌ها نشان می‌دهد که هیچ چرخشی اتفاق نیفتاده‌است که نشان‌دهندهٔ صلبیت تکیه‌گاه باشد.

مشاهدات و رفتار کلی نمونه‌ها

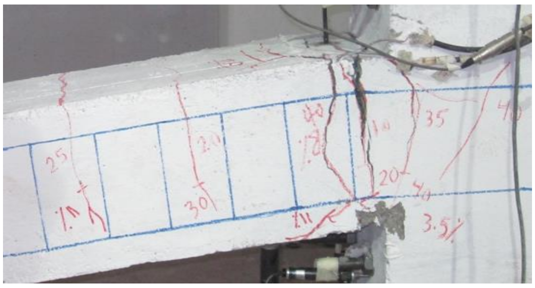
نمونهٔ RCS نمونهٔ مرجع استاندارد می‌باشد که از بتن معمولی ساخته شده‌است و دارای خاموت‌گذاری فشرده به‌طول 2d از بر تکیه‌گاه می‌باشد. در شکل (٦)

نمونهٔ RCS در انتهای بارگذاری (تخریب) نشان داده شده‌است. اولین ترک‌خوردگی در نیروی ۹/۵ کیلونیوتن رخ می‌دهد. در نیروی ۴۳ کیلونیوتن و تغییرمکان ۳۶/۱۳ میلی‌متر ترک‌های برشی در مجاورت تکیه‌گاه ظاهر می‌گردد. این ترک‌ها با افزایش نیرو گسترش می‌یابند و به‌سمت بخش فشاری تیر حرکت می‌کنند.



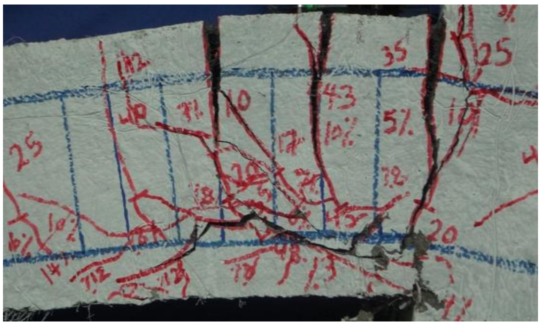
شکل ٦ نحوهٔ انهدام تیر RCS در انتهای بارگذاری

در نمونهٔ RCN نمونهٔ مرجع که از بتن معمولی ساخته شده‌است و بدون خاموت‌گذاری فشرده می‌باشد، اولین ترک‌خوردگی در بار ۱۰ کیلونیوتن رخ می‌دهد. در شکل (۷) نمونهٔ RCN در انتهای بارگذاری نشان داده شده‌است.



شکل ۷ نحوهٔ انهدام تیر RCN در انتهای بارگذاری

نمونهٔ RHS0.5 نمونهٔ ساخته‌شده با کامپوزیت سیمانی و نیم درصد الیاف می‌باشد که دارای خاموت‌گذاری فشرده‌است. اولین نیروی ترک‌خوردگی در این تیر در بار ۱۰ کیلونیوتن می‌باشد. در دریفت ٦ درصد و بار ٤٨ کیلونیوتن ترک مورب به‌فاصلهٔ ۱۵ سانتی‌متر از بر تکیه‌گاه رخ می‌دهد. در دریفت ۱۲ درصد و بار ٤٢/٥ کیلونیوتن ترک‌های قطری نزدیک اتصال باز می‌شوند. الگوی انهدام نمونهٔ RHS0.5 این تیر در شکل (۸) نشان داده شده‌است.



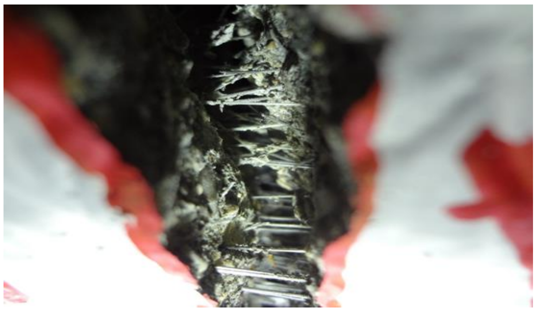
شکل ۸ نحوهٔ انهدام تیر RHS0.5 در انتهای بارگذاری

نمونهٔ RHN0.5 نمونهٔ ساخته‌شده با کامپوزیت سیمانی و نیم درصد الیاف می‌باشد که بدون خاموت‌گذاری فشرده است. اولین ترک‌خوردگی تحت نیروی ۱۰ کیلونیوتن در بر تکیه‌گاه رخ می‌دهد. در نیروی ٤٤/٥ کیلونیوتن و تغییرمکان حدود ٦٠/٣٦ میلی‌متر، ترک‌های برشی در فاصلهٔ ۱۵ سانتی‌متری از بر تکیه‌گاه و با زاویهٔ ٤٥ درجه از بالا به پایین در شکل (۱۰) ظاهر می‌گردد. پل زدن الیاف در این نمونه به‌وضوح نمایان شده‌است که در شکل (۹) نشان داده شده‌است.

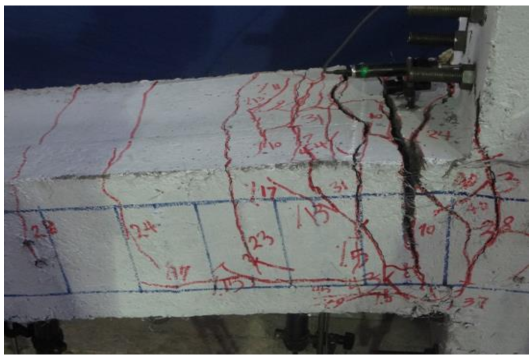
نمونهٔ RHS1 نمونهٔ ساخته‌شده با کامپوزیت سیمانی و یک درصد الیاف می‌باشد که بدون خاموت‌گذاری فشرده است. اولین ترک‌خوردگی تحت نیروی حدود ۸ کیلونیوتن و تغییرشکل حدود ۱/۲٥ میلی‌متر در انتهای دهانه اتفاق می‌افتد. در دریفت ۷ درصد و بار ٤۷/۸ کیلونیوتن و تغییرمکان ٨٤ میلی‌متر ترک قطری به‌فاصلهٔ ۲۰ سانتی‌متر از تکیه‌گاه رخ می‌دهد. در دریفت ۱۲ درصد و بار ٤٨ کیلونیوتن و تغییرمکان ۱٥۲ میلی‌متر ترک‌های قطری به‌فاصلهٔ ۲۰ سانتی‌متر از بر تکیه‌گاه بیشتر می‌شود و عرض ترک‌های قطری زیاد می‌شود. الگوی انهدام نمونهٔ RHS1 این تیر در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است.

نمونهٔ RHN1 نمونهٔ ساخته‌شده با کامپوزیت سیمانی و یک درصد الیاف می‌باشد که بدون خاموت-

گذاری فشرده است. اولین ترک‌خوردگی تحت نیروی حدود ۱۲ کیلونیوتن و تغییرشکل حدود ۳/۹۵ میلی‌متر در انتهای دهانه اتفاق می‌افتد. در دریفت ٤ درصد و نیروی ٤٦/٦٣ کیلونیوتن و تغییرمکان حدود ٤٨/٧ میلی‌متر، ترک‌های برشی در فاصلهٔ ۱۵ سانتی‌متری تکیه‌گاه‌ها و با زاویهٔ ٤٥ درجه ظاهر می‌گردند. الگوی انهدام نمونهٔ RHN1 این تیر در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است.



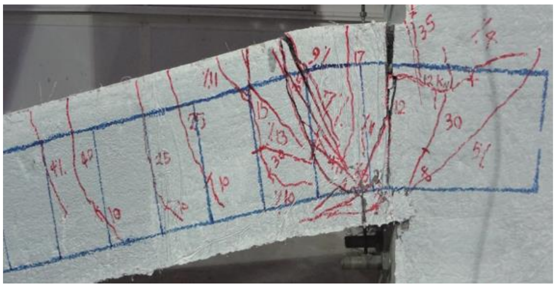
شکل ۹ پل زدن الیاف در تیر RHN0.5



شکل ۱۰ نحوهٔ انهدام تیر RHN0.5 در انتهای بارگذاری



شکل ۱۱ نحوهٔ انهدام تیر RHS1 در انتهای بارگذاری



شکل ۱۲ نحوهٔ انهدام تیر RHN1 در انتهای بارگذاری

نتایج و بحث

در جدول (۵) مقاومت نهایی P_u (متناظر با ماکزیمم تغییرمکان در هنگام شکست) و شکل‌پذیری (نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان جاری شدن) هر شش نمونهٔ آزمایشگاهی و درصد افزایش P_u و شکل‌پذیری نمونه‌های حاوی بتن HPFRCC نسبت‌به نمونه بتن معمولی مرجع آمده‌است. شکل‌پذیری نمونه برابر $\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ که Δ_u جابه‌جایی نهایی تیر و در صورت وجود افت نیرو برابر جابه‌جایی نظیر بار $0.85P_{max}$ می‌باشد و Δ_y نیز جابه‌جایی نظیر بار جاری شدگی P_y آرماتورهای طولی بر تیر اتصال می‌باشد. میزان جذب انرژی نمونه‌ها در جدول (٦) آمده‌است. منحنی‌های پوش هر یک از نمونه‌ها نیز در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند.

باتوجه به جدول (۵) شکل‌پذیری تیر RHN0.5 نسبت‌به تیر RCN حدود ۷۷ درصد بیشتر شده‌است. در تیر RHN1 افزایش شکل‌پذیری نسبت‌به تیر مرجع ۲۵ درصد می‌باشد. تیر RHS0.5 نسبت‌به RCS دارای ۹۷ درصد شکل‌پذیری بیشتر است. تیر RHS0.5 نیز ٤ درصد شکل‌پذیرتر از تیر RHN0.5 می‌باشد. میزان شکل‌پذیری تیر RHS1 ، ۲۲ درصد بیشتر از تیر RHN1 می‌باشد. شکل‌پذیری تیر RHS0.5 نیز ۵۵ درصد بیشتر از تیرRHN1 می‌باشد. میزان شکل‌پذیری در تیرها با نیم درصد الیاف بیشتر از حالت‌های دیگر است. حداکثر شکل‌پذیری در تیر RHS0.5 رخ داده‌است. این اتفاق به‌دلیل عدم افت بار در نمونه‌های بتن توانمند تا دریفت

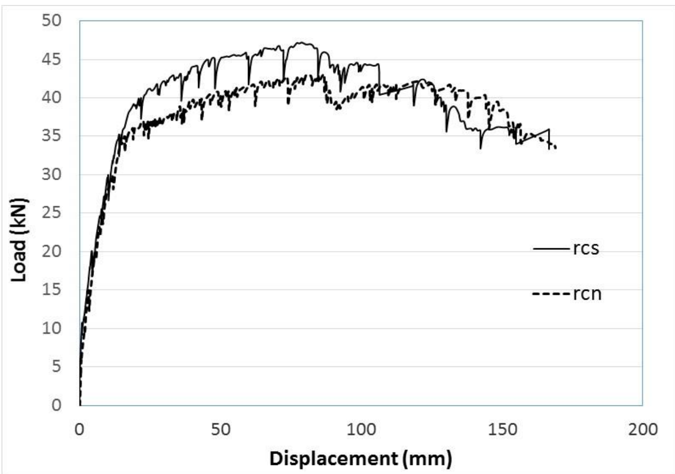
۲۳ درصد می‌باشد، باتوجه به محدودیت استروک جک اعمال بار، آزمایش در دریفت پایان یافته‌است. در صورت امکان ادامه آزمایش افزایش میزان شکل‌پذیری و جذب انرژی بدیهی می‌باشد.

جدول ۵ مقایسهٔ کلی نتایج نمونه‌ها

نام تیر	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{P_{max RCS}}$	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu_n}{\mu_{RCS}}$
RCS	۹/۵	۳۵	٤۷	۱	۱٦	۱۲۸	۷/۸۵	۱
RCN	۱۰	۳٤	٤۳	۰/۹۱	۱۸	۱۵۲	۸/٤	۱/۰۷
RHS0.5	۱۰	٤۰	٤۸	۱/۰۲	۱۷/۷	۲۷۵	۱۵/۵	۱/۹۷
RHN0.5	۱۰	۳۷	٤۵	۰/۹۷	۱۷/٤۵	۲۷۰	۱۵/٤۷	۱/۹۷
RHS1	۸	٤۱	۵۰	۱/۰٦	۲۲	۲٦۸	۱۲/۲	۱/۵۵
RHN1	۱۲	٤۲	۵۰/٦	۱/۰۷	۲۵/۸	۲۷۰	۱۰/۵	۱/۳۳

جدول ٦ میزان جذب انرژی نمونه‌ها

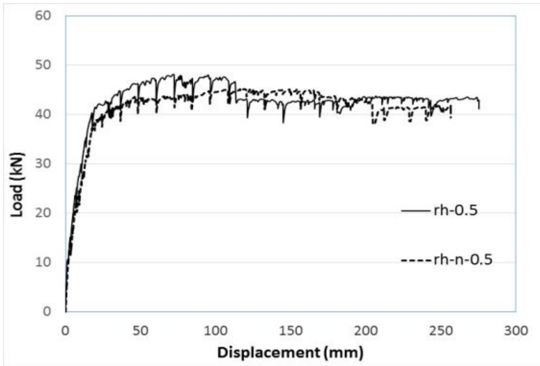
نام تیر	(سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان تا Δ_U) Kn-mm	$\frac{W}{W(RCS)}$
RCS	۵۸۱۸/٦	۱
RCN	۵۹۸۱/۱	۱/۰۲
RHS0.5	۱۲٦۵۳	۲/۱۷
RHN0.5	۱۲۱۸۳	۲/۰۹
RHS1	۱۳۵۷۷	۲/۳۳
RHN1	۱۳۵۸۵/٦	۲/۳۳



شکل ۱۳ منحنی بار- تغییرمکان تیرهای مرجع استاندارد و غیراستاندارد

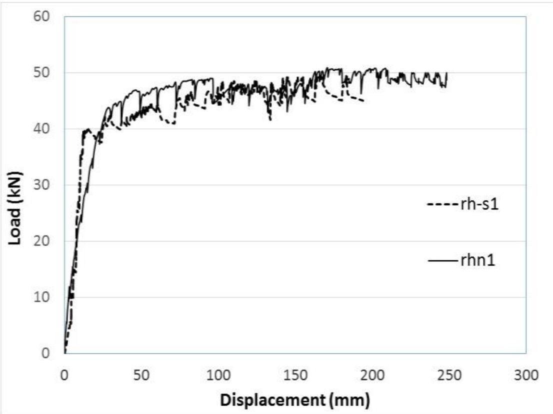
باتوجـه بـه جـدول (٦) میـزان جـذب انـرژی در نمونه‌های بتن توانمند بیشتر از نمونه‌های مرجع می‌باشد که این میزان در نمونه بتن توانمند با یک درصـد الیـاف تا ۲/۳۳ برابر نمونهٔ مرجع رسیده‌است.

بررسی بین تیر RCS و تیر RCN در شکل (۱۳) نشان می‌دهد که تیر با خاموت‌گذاری ویژه دارای حداکثر بار بیشتر نسبت‌به تیر بدون خاموت‌گذاری ویژه می‌باشد. حداکثر بار تیر RCS برابر ٤٧ کیلونیوتن می-باشد که این حداکثر بار در تیر RCN، برابر ٤٣ کیلونیوتن است که نشانگر ۹ درصد افزایش در حداکثر بار تحمل‌شده است. میزان شکل‌پذیری در تیر RCN به‌میزان ۷ درصد بیشتر از تیر RCS می‌باشد. این موضوع به دلیل افت ناگهانی بار در تیر RCS قابل توجیح است، به دلیل این‌که بسیاری از پارامترهای فوق تا میزان ۸۵ درصد بار حداکثر محاسبه می‌شوند.



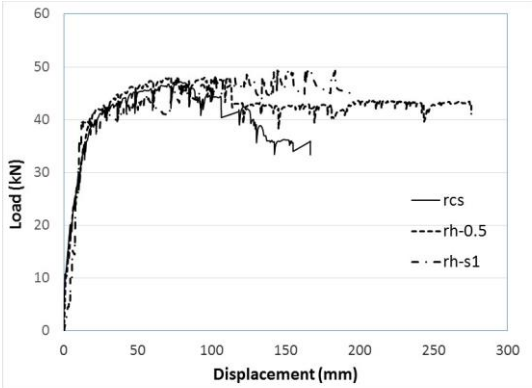
شکل ١٤ منحنی بار- تغییرمکان بتن توانمند با نیم درصد الیاف

بررسی بین تیر RHS0.5 و تیر RHN0.5 در شکل (١٤) نشان می‌دهد که تیر با خاموت‌گذاری ویژه دارای حداکثر بار بیشتر نسبت‌به تیر بدون خاموت-گذاری ویژه می‌باشد. حداکثر بار تیر RHS0.5 برابر ٤٨ کیلونیوتن می‌باشد که این حداکثر بار در تیر RHN0.5، برابر ٤٥ کیلونیوتن است که نشانگر ٦/٥ درصد اختلاف در حداکثر بار تحمل شده‌است. میزان شکل‌پذیری در تیر RHS0.5 به‌میزان ٤ درصد بیشتر از تیر RHN0.5 می‌باشد. میزان جذب انرژی در تیر RHS0.5 بیش از ٤ درصد از تیر RHN0.5 بیشتر می‌باشد. در این نمونه‌ها تا دریفت ۲۳ درصد تست ادامه پیدا کرد اما افت بار در نمونه‌ها مشاهده نشد.



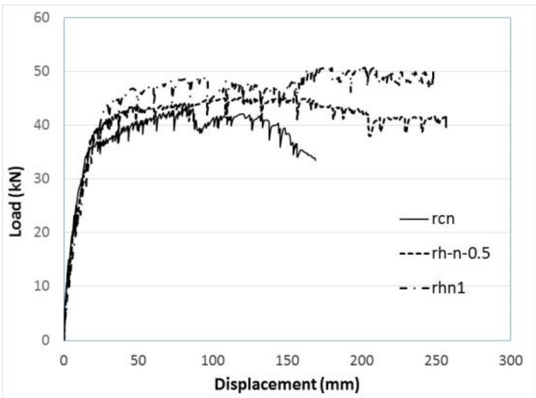
شکل ۱۵ منحنی بار- تغییرمکان بتن توانمند با یک درصد الیاف

باتوجه به شکل (۱۵) حداکثر بار در هر دو تیر تقریباً برابر شده‌است، منحنی‌ها بسیار به‌هم نزدیک شده‌اند و در قسمت زیادی یک روند را طی می‌کنند که در منحنی بار- تغییرمکان مشهود می‌باشد. حداکثر بار تیر RHS1 برابر ۵۰ کیلونیوتن می‌باشد که این حداکثر بار در تیر RHN1، برابر ٥٠/٦ کیلونیوتن است که نشانگر ۱ درصد اختلاف در حداکثر بار تحمل‌شده است. میزان شکل‌پذیری در تیر RHS1 به‌میزان ۲۲ درصد بیشتر از تیر RHN1 می‌باشد. میزان جذب انرژی در هر دو تیر برابر می‌باشد. در این نمونه‌ها تا دریفت ۲۲ درصد تست ادامه پیدا کرد اما افت بار در نمونه‌ها مشاهده نشد. باتوجه به منحنی بار- تغییرمکان می‌توان خاموت‌گذاری فشرده را در تیر حذف کرد. میزان افزایش حداکثر بار در تیرها بدون خاموت‌گذاری فشرده بیشتر می‌باشد. میزان افزایش حداکثر بار در تیر بدون خاموت‌گذاری فشرده با نیم درصد و یک درصد الیاف نسبت‌به نمونهٔ مرجع مطابق شکل (١٦) به‌ترتیب برابر۱۲/۵ و ۱۷/۵ درصد می‌باشد. میزان طاقت تیرهای RHS1 و RHN1 نسبت‌به تیر مرجع به‌ترتیب ۱/۷۲ و ۱/۵۱ افزایش یافته‌است.



شکل ۱۶ منحنی بار- تغییرمکان تیر مرجع و بتن توانمند با خاموت‌گذاری ویژه

افزودن الیاف به تیرهای HPFRCC باعث افزایش حداکثر نیروی تحمل‌شده به‌میزان ۲ و ٦ درصد به‌ازای نیم و یک درصد الیاف می‌گردد. هم‌چنین شکل‌پذیری و جذب انرژی را افزایش می‌دهد. افزودن الیاف باعث نرم شدن نمودار می‌گردد. الیاف باعث افزایش نیروی جاری شدن آرماتور می‌شوند. در شکل (۱۷) نیروی جاری شدن آرماتورها به‌ترتیب ١٤ و ۱۷ درصد نسبت‌به نمونهٔ مرجع افزایش یافته‌است. تغییرمکان معادل ترک‌خوردگی، جاری‌شدن و حداکثر بار افزایش می‌یابد. الیاف باعث انسجام بتن می‌گردند و از انهدام ناحیهٔ فشاری بتن جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۷ منحنی بار- تغییرمکان تیر مرجع و بتن توانمند بدون خاموت‌گذاری ویژه

در بتن توانمند بدون خاموت‌گذاری فشرده حداکثر نیروی تحمل‌شده به‌میزان ٤/٥ و ۱۷/٥ درصد به‌ازای نیم و یک درصد الیاف نسبت‌به نمونهٔ بتن معمولی افزایش می‌یابد. الیاف در تیرها بدون خاموت فشرده اثر بیشتری برروی افزایش حداکثر نیروی تحمل‌شده داشته‌است. هم‌چنین شکل‌پذیری و جذب انرژی را افزایش می‌دهد. نیروی جاری شدن آرماتورها به‌ترتیب ۸/۸ و ۲۳/٥ درصد افزایش یافته‌است. میزان جذب انرژی در تیر RHS1 نسبت‌به تیر مرجع بیشتر است. هم‌چنین در تیرهای HPFRCC افت بار مشاهده نشده‌است.

نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی تأثیر بتن‌های کامپوزیتی سیمانی توانمند بر رفتار تیرهای بتن‌آرمهٔ طره‌ای و امکان‌سنجی جایگزینی این بتن‌ها برای حذف خاموت‌های فشرده در ناحیهٔ بحرانی، شش نمونه تیر طره‌ای شامل دو نمونهٔ مرجع بتن معمولی با خاموت‌گذاری ویژه (RCS) و بدون خاموت‌گذاری ویژه (RCN) و چهار نمونه با بتن کامپوزیتی سیمانی توانمند HPFRCC (با نیم و یک درصد الیاف با خاموت‌گذاری ویژه به‌نام‌های RHS1 و RHS0.5 و بدون خاموت RHN1 و RHN0.5) تحت بار افزاینده قرار گرفتند که مشاهدات رفتاری و نتایج به‌دست‌آمده از انجام آزمایش‌ها برروی نمونه‌ها به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

۱. در تیرهای بتنی مرجع با و بدون خاموت فشرده، ترک‌ها با نرم‌شوندگی منحنی تنش- کرنش کششی همراه می‌شود و ظرفیت باربری سازه با افزایش ترک‌ها کاهش می‌یابد؛ لذا تکیه بر آرماتورها برای حفظ سازه ضروری است؛ اما در تیرهای با بتن کامپوزیتی توانمند میکروترک‌ها باعث ورود مصالح به مرحلهٔ سخت‌شوندگی می‌شود و ظرفیت باربری بالا می‌رود.

۲. خاموت فشرده باعث سختی بیشتر تیرها و افزایش جذب انرژی و شکل‌پذیری بالاتر می‌شود. بتن کامپوزیتی توانمند با یک درصد الیاف باعث انطباق تقریبی منحنی بار- تغییرمکان در حالت خاموت‌گذاری فشرده و غیرفشرده گردیده‌است. جذب انرژی و شکل‌پذیری و حداکثر بار تقریباً برابر شده‌است. درنتیجه می‌توان خاموت‌گذاری فشرده را در تیرهای کامپوزیتی توانمند با یک درصد الیاف حذف کرد.

۳. الیاف باعث افزایش حداکثر نیروی تحمل‌شده می‌شوند. حداکثر نیرو در تیرهای کامپوزیتی توانمند دارای خاموت فشرده با یک و نیم درصد الیاف نسبت‌به نمونهٔ مرجع بتن معمولی با خاموت فشرده به‌ترتیب به‌میزان ٦ و ۲ درصد افزایش یافته‌است. این میزان افزایش در تیرهای کامپوزیتی توانمند بدون خاموت فشرده با یک و نیم درصد الیاف به‌ترتیب برابر ۱۷/۵ و ٤/۵ درصد می‌باشد که نشانگر تأثیر بیشتر الیاف در نمونه‌های فاقد خاموت فشرده‌است.

٤. باتوجه به الگوی ترک‌خوردگی در تیرها، در نمونه‌های بتن توانمند الگوی ترک‌خوردگی به ترک‌های ریز چندگانه تبدیل می‌شود. میزان ترک‌ها در تیرهای با خاموت فشرده بیشتر است.

۵. میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری در تیرهای کامپوزیتی توانمند نسبت‌به بتن مرجع به‌ترتیب در حالت حداکثر، ۹۷ درصد و۲/۳۳ برابر افزایش یافته‌است.

مراجع

۱. همتی، علی، «بررسی رفتار خمشی تیرها و قاب‌های بتن مسلح کامپوزیتی الیافی توانمند»، پایان‌نامهٔ دکترا، دانشگاه سمنان، (۱۳۹۲).

2. Parra-Montesions, G. J., "High-performance Fiber-reinforced Cement Composites: An Alternative for Seismic Design of Structures", *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 5, Pp.668-675, (2005).

3. Hamman, D. J., "Fiber Cements and Fiber Concretes", John Wiley and Sons, New York, 213 pages, (1988).

4. Romualdi J. P. and Batson G. B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete", *Journal of engineering mechanics*, ASCE Proc, 89(EM3), Pp. 147–168, (1963).

5. Romualdi J. P. and Mandel J. A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", *Journal of ACI*, Pp. 657–670, (1964).

6. Bolander, J., "Spring Network Model of Fiber Reinforced Cement Composites", High performance fiber reinforced cement composites, HPFRCC 3, H. W. Reinhardt and A. E. Naaman, Pp. 341-350, (1999).

7. Vandewalle, L. et al., "RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete", Sigma-epsilon-design method- Final Recommendation, Materials and Structures 36(262), Pp. 560-567, (2003).

8. Aveston, J. Cooper, G. A. and Kelly, A., "Single and Multiple Fracture, the Properties of Fiber Composites", *Conference proceedings of national physical laboratory*, IPC, science and technology press, Ltd. Pp. 14-24, (1971).

9. Krenchel, H. and Stang, H., "Stable Micro-cracking in Cementitious Materials", in brittle matrix

composites 2. A. M. Brandt and J. H. Marshall, eds., Pp. 20-33, (1989).

10. Curbach, M. and Jesse, F., "High-performance Textile-reinforced Concrete", Structural engineering international 9(4, 1):289-291(3), (1999).
11. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W., "Setting the Stage: Toward Performance-based Classification of FRC Composites", In high performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC-4), Proc. of the 4th Int'l RILEM workshop, A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, (2003).
12. قدسی، فرشید، آذر، «بررسی خواص مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف فولادی مجعد با مقاومت کششی و شکل‌پذیری بـالا»، نشـریهٔ دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، (۱۳۸۷).
13. Farhat, F. A., Nicolaides, D., Kanellopoulos, A. and Karihaloo, B. L., "High Performance Fiber-reinforced Cementitious Composite (CARDIFRC)-performance", (2007).
14. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., "Composition of Reactive Powder Concretes", cement and concrete research, Vol. 25, No.7, Pp. 1501-1511, (1995).
15. Habel, H., Gauvreau, P., "Response of UHPFRC to Impact and Static Loading", cement and concrete composites, Pp. 938-946, (2008).
16. همتی، علی، خیرالدین، علی، شربتدار، محمدکاظم، بررسی عددی افزایش ظرفیت باربری قاب بتن مسـلح بـااسـتفاده کامپوزیـت‌هـای سیمانی مسلح الیافی توانمند، مجله علمی و پژوهشی شریف، دانشگاه شریف، (۱۳۹۲).
17. Hemmati, A., kheyroddin, A., Sharbatdar, M. K., "Plastic Hinge Rotation Capacity of Reinforced HPFRCC Beam", *Journal of Structural engineering*, ASCE, (2013).
18. Shi, C., Mo, Y. L., "High Performance Construction Materials, Science and Applications", (2008).
19. Fukuyama, H. and Suwada, H., "Experimental Response of HPFRCC Dampers for Structural Control", *journal of advanced concrete technology*, Vol.1, No.3, Pp. 317-326, (2003).
20. Parra-Montesinos, G., "Proposed Addition to ACI Code 318-05 on Shear Design Provisions for Fiber Reinforced Concrete Members", (2006).
21. Hiroshi Fukuyama, "HPFRCC Device for Structural Control of Building with Soft Story", 6th RILEM symposium on fiber –reinforced concretes (FRC)-BEFIB2004,Varenna, Italy, Pp. 1163-1172, (2004).